齿面微织构对齿轮润滑特性的影响研究

宋晖[1],王雨[1],王亚东[2],陈奇[1],吴焱明[1],尹延国[1],陈远龙[1]

(1.合肥工业大学,230009 合肥;2.安徽汽车职业技术学院,230091 合肥)

摘　要:表面微织构具有改变摩擦表面润滑状态的特点,已在齿轮传动中获得了应用。开展沟槽形状的微织构对齿轮润滑的影响研究。首先,对微织构齿面齿轮进行参数化建模,实现自动生成理想的沟槽;然后,将微沟槽织构简化为两种模型,导入 ANSYS 的 Fluent 模块中,并分别对沟槽不同的参数(如:沟槽宽度、深度、角度、间距)进行分析。结果表明:随着沟槽宽度的增大,承载能力增强;微沟槽深度对润滑压力的影响存在一最优值;适当的增大沟槽间距、微沟槽角度可提高润滑脂的流动性和连续性,从而增进和保持润滑效果。

关键词:齿面;微织构;润滑特性

中图分类号:TH117.2　　　　**文献标志码:**A

Research on the influence of tooth surface micro-texture on gear lubrication characteristics

SONG Hui[1],WANG Yu[1],WANG Yadong[2],CHEN Qi[1],WU Yanming[1],YIN Yanguo[1],CHEN Yuanlong[1]

(1. Hefei University of Technology,230009 Hefei,China;2. Anhui automobile Career Technical College,230091 Hefei,China)

Abstract: The surface micro-texture has the characteristic of changing the lubrication state of the friction surface,and has been applied in gear transmission. In this paper,the effect of groove shape micro-texture on gear lubrication is studied. First,the secondary development of micro-textured tooth surface gears is used to automatically generate ideal grooves. Then the micro-groove texture is simplified into two models, which can be imported into the Fluent module of ANSYS in order to analyze the different parameters of the groove (such as groove width,depth,angle,and spacing). The numerical results show that as the width of the groove increases,the carrying capacity increases. The influence of the depth of micro grooves on the lubrication characteristics is non-linear,with an optimal value. Properly increasing the groove spacing and the angle of the micro grooves can improve the fluidity and continuity of the lubricating oil,thereby improving and maintaining the lubrication effect. This article lays a theoretical foundation for further application of micro-textured gears.

Key words:gear surface;micro-texture;lubrication property

随着弹流润滑研究的深入,学者们开始思考表面织构形貌对于润滑特性的影响作用,并通过试验

收稿日期:2020-06-16　　　　**修回日期:**2021-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51775158;51775161);中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. JZ2019YYPY0020)

通信作者:陈奇,教授。E-mail: qichen@hfut.edu.cn

引用格式:宋晖,王雨,王亚东,等.齿面微织构对齿轮润滑特性的影响研究[J].应用力学学报,2022,39(1):113-120.

SONG Hui,WANG Yu,WANG Yadong,et al. Research on the influence of tooth surface micro-texture on gear lubrication characteristics[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(1):113-120.

和数值模型对何种表面形貌能获得较好的润滑特性展开了研究,得出了大量关于织构参数(微凹坑形状、尺寸、分布)优化表面润滑特性的结论。Costa等[1]通过固定圆柱体和完全纹理的样品板进行了大量往复式滑动测试,这些样品板具有在不同的方向、深度、密度和纵横比下的凹槽,如圆形或人字形凹痕,观察到纹理化对膜厚度的影响明显,发现纹理取向沿滑动方向指向的 V 形最有效。Qiu 等[2]使用雷诺方程的可压缩形式来模拟具有六种不同凹坑形状(球形、椭圆形、圆形、方形,三角形和人字形)的气体润滑平行滑动轴承的性能,并进一步强调每种形状都有一个最佳的几何形状,但该几何形状取决于优化纹理的方式。Shen 等[3]提出了一种基于顺序二次规划(SQP)算法的数字纹理形状优化方法,经过优化,对在 30% 的纹理密度下可提供更高的承载能力,在较低的密度下,这种优势会减弱。文献[4-5]针对多种应用场合进行了织构表面的弹流润滑问题数学建模。该方法在润滑良好情况下能获得准确的计算结果,认为织构形貌的存在能增强表面油膜承载能力,从而改善表面润滑特性。Ma 等[6]通过建立织构表面弹流润滑数学模型对圆形微凹坑的织构参数进行了优化,并通过试验验证了优化结果。汤丽萍等[7]分析了交叉纹理深宽比、夹角以及分布密度对摩擦性能的影响,结果对研究纹理参数对摩擦性能的影响及考虑弹性变形的润滑研究有参考意义;发现寻找适合的工艺,在齿轮副表面进行凹坑织构的制备,对抗磨减阻具有积极的意义。万轶等[8]利用摩擦试验机对织构表面钢盘进行摩擦学性能测试,发现在油润滑情况下织构形貌可以增加摩擦界面间润滑脂膜厚度,使流体产生额外动压,从而提高表面润滑性能和抗磨损性能。文献[9-10]提出的仿生齿面构型,证明了齿面的凹坑式微织构能有效提高齿面强度和改善润滑性能。葛良辰等[11]在微凹坑织构中发现面积占有率对织构效果的影响最为显著,但最优面积占有率的选取还需进一步考虑工况等客观因素的影响。张赟等[12]发现不同的微织构对导轨副造成不同的减摩效果,其原因是不同的微织构的存储和供应润滑油的能力、产生额外流体动压效应的能力和改善接触面接触应力的能力不同。解玄等[13]在脂润滑条件下,发现 PTFE 与微织构耦合是一种有效的复合减摩手段。随着织构密度的提升,表面摩擦系数先减小后增大;当织构密度为 20% 时,表面摩擦系数最小。以上学者得出微织构能提高表面润滑,但未专门研究微织构为沟槽时的齿轮润滑分析,且未对微沟槽宽度、深度、角度、间距等问题进行研究。

基于以上研究,本文综合考虑沟槽形状齿面的微织构对齿轮齿面强度和润滑性能的影响,通过 Fluent 软件进行仿真分析,探究微沟槽各参数对流场和润滑特性的影响。为了减少研究工作的繁琐性,通过 CATIA 和 VB 对齿面微观设计进行参数化建模,快速建立具有微织构齿面的齿轮。

1　齿面微观设计建模方法

1.1　齿面沟槽设计

本文采用的交叉网纹型沟槽具有储存润滑介质、改善流体动压润滑等作用,网格状沟槽有利于润滑剂的流动和均匀分布。其主要参数包括:槽宽 w_g、槽深 h_g、网纹槽间距 m_g 和沟槽角度 δ。齿轮齿面交叉网格沟槽和微织构结构参数示意图如图 1 ~ 图 3 所示。

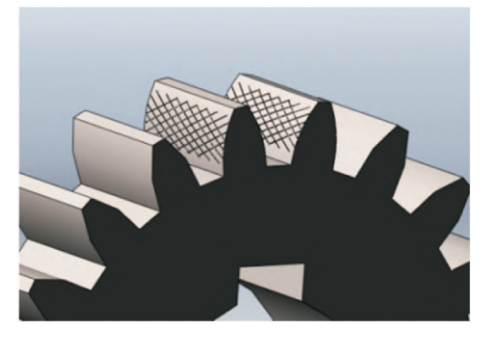


图 1　齿面交叉网状沟槽

Fig. 1　Cross mesh groove of tooth surface

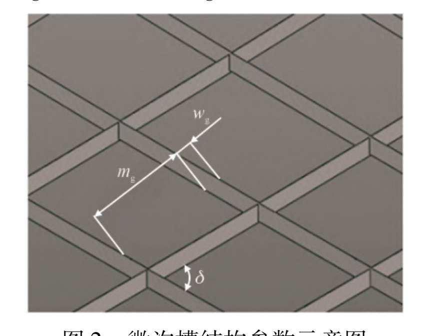


图 2　微沟槽结构参数示意图

Fig. 2　Schematic diagram of structural parameters of micro-groove



图 3　微沟槽局部放大图

Fig. 3　Local amplification of micro-grooves

1.2 参数化建模

直齿轮的参数为:齿数 $z=20$,模数 $m=4$ mm,压力角 $\alpha=20°$;齿轮齿面的硬度大于 350 HB,齿轮为非对称配置,载荷变动较大,取齿宽系数为 0.2 ~ 0.4;此处的分度圆直径 80 mm,取齿宽为 18 mm,其对应的直齿轮模型如图 4 所示[14]。

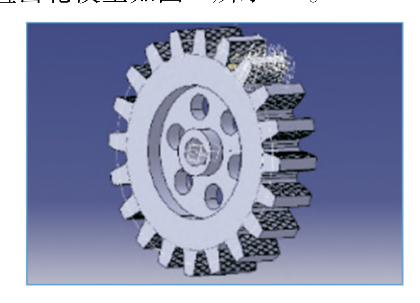


图 4 直齿轮网格沟槽

Fig. 4 Spur gear mesh groove

2 齿面微沟槽的润滑特性分析

2.1 微沟槽的 Fluent 模型

为了分析和显示微沟槽各参数对流场特性的影响,现将齿轮模型导入至 ANSYS 中,并通过前处理工具 Space Claim 对其处理。此处主要将微沟槽织构简化为两种模型[15]。模型一为齿宽方向沟槽简化模型,主要研究沟槽宽度 w_g 和深度 h_g 对流场的影响。通过创建基准面将齿轮轮齿沿齿宽方向切割,再通过投影命令获得沟槽的轮廓线,如图 5 所示,其简化模型如图 6 所示。模型二为齿面沟槽简化模型,主要研究沟槽角度 δ 和间距 m_g 对流场的影响,可通过 Space Claim 直接创建齿面微沟槽的二维模型,如图 7 所示。

接下来进行模型网格划分。由于模型为二维模型,简单平整,故直接选择 automatic-自动划分法,主要生成六面体网格,不规则的地方(不能被扫掠)则自动生成四面体。设置 element size,取值为 0.03 mm,其网格划分如图 8 和图 9 所示,图 8 网格数量为 4 778,图 9 网格数量为 4 438。

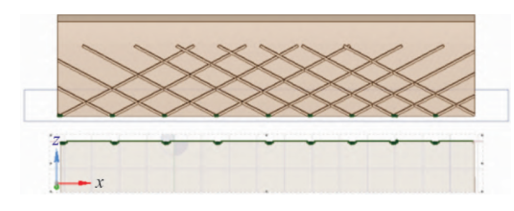


图 5 模型一沟槽轮廓截取

Fig. 5 Intercept the groove profile of model 1

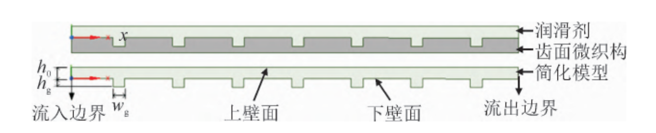


图 6 模型一齿宽方向沟槽简化模型

Fig. 6 Simplified model of model 1

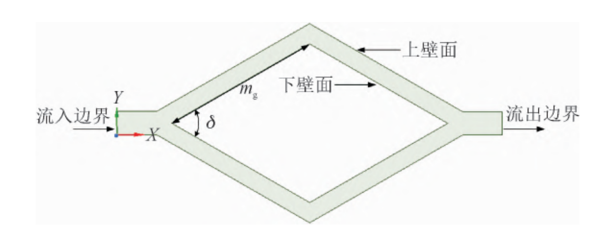


图 7 模型二简化模型

Fig. 7 Simplified model of model 2

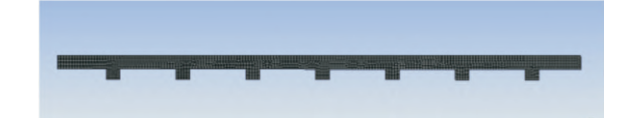


图 8 模型一沟槽网格图

Fig. 8 Groove grid of model 1

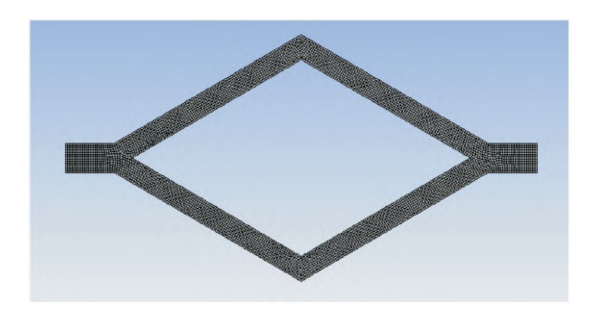


图 9 模型二网格图

Fig. 9 Groove grid of model 2

本文研究的模型为周期流动模型,其“对称面或对称边”上的网格需划分为一致,可通过 Mesh 插入 Match Control 命令完成。边界条件设置如图 6 和图 7 所示:模型的左壁面设为流入边界(inlet),右壁面为流出边界(outlet),通过 Fluent 将二者设定为周期边界条件;上壁面为固壁边界 wall 1,下壁面为固壁边界 wall 2,均设为定静不动;h_0 为膜厚。流场设置为层流(laminar),流体介质为 M_0-C-Li(M_0S_2-C 型锂基润滑脂),密度847 kg/m^3,动力黏度0.043 6 Pa · s;周期边界流量 0.05 kg/s。求解方法为压力耦合 SIMPLE 算法,压力和动量项均选择二阶中心差分。

判断流场为层流还是湍流,主要依据雷诺数,其临界值一般取为 2 000。当 $Re>2\ 000$ 时为湍流,反之为层流。本文研究的微沟槽属于非圆形管道,雷

诺数定义如下。

$$Re = \frac{Vd_K}{v} \quad (1)$$

式中：V 为截面的平均速度；v 为流体的运动黏度；d_K 为异形管道直径，定义如下。

$$d_K = 4 \times \frac{S}{L} \quad (2)$$

式中：S 为过流截面面积；L 称为湿周，为过流断面液体与固体接触的周长。

以 $w_g = 40$ μm 和 $h_g = 30$ μm 的沟槽截面为例，假设常规载荷下齿轮转速为 2 400 r/min，计算得到截面的平均流速 $V = 10$ m/s，流体的运动黏度 $v = 0.05$ mm^2/s，将各参数代入式(1)和式(2)，计算可得

$$d_K = 4 \times \frac{S}{L} = 4 \times \frac{0.03 \times 0.04}{0.1} = 0.048(\text{mm}) \quad (3)$$

$$Re = \frac{Vd_K}{v} = 4 \times \frac{1\,000 \times 0.048}{0.05} = 960 \quad (4)$$

由式(4)结果知，$Re < 2\,000$，所以本模型为层流模型。

最后，进行初始化，运行程序仿真，分析结果。

2.2 微沟槽宽度对流场的影响

对模型一微沟槽宽度对流场的影响进行分析。图 10 为 Y 方向流速效果图，从图中可以看出，每个沟槽处均形成了两个速度差别较大的流场，不论宽度 w_g 和深度 h_g 如何改变，沟槽上壁面的左侧和右侧区域均形成高低速区。

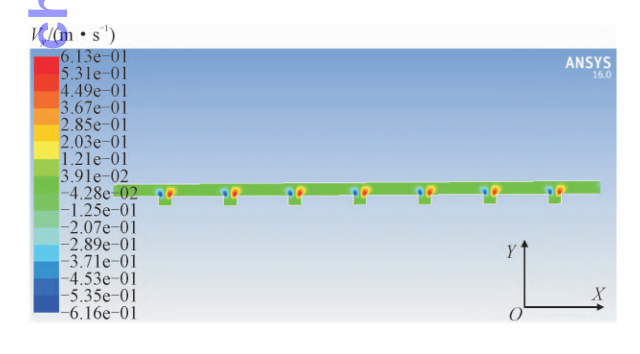


图 10 Y 方向流速效果图

Fig. 10 Flow velocity in Y direction

设定沟槽深度 $h_g = 30$ μm，分析沟槽宽度 w_g 分别为 40 μm、60 μm 和 80 μm 时的流场特性。图 11 为沟槽宽度 w_g 对流场影响的矢量图，箭头代表流体的流动方向，线条越密集表示流速越大。可以看出：当 $w_g = 40$ μm 时，线条较稀疏，且沟槽内部分流很少。当 w_g 为 60 μm 和 80 μm 时，线条明显变得密集，内部分流增多；箭头从内壁左侧的红色变为绿色，到内壁右侧又变回红色，经历了减速到增速的过程；润滑脂油膜流经沟槽时，截面积扩大，流速降低，形成低速区；相反，流出沟槽时，截面积收缩，流速增大，形成高速区。

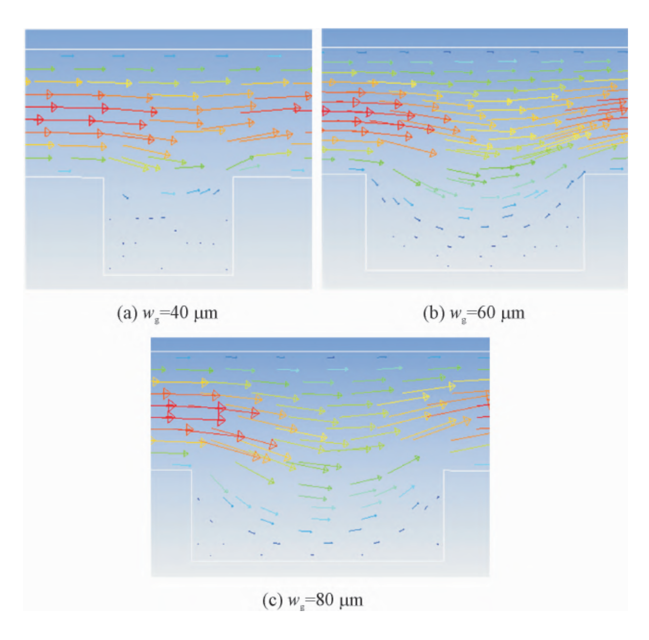


图 11 沟槽宽度对流场影响的矢量图

Fig. 11 Vector diagram of the width effect on the flow field

图 12 为上壁面(wall 1)静压力变化图。由图可知：上壁面压力整体上为波浪形交替此起彼伏，压力值先减小、再增大，且随着 w_g 的增大而增大。刚开始，在沟槽上壁面的左侧区域压力骤降，再缓缓上升，下降幅度大于上升幅度；接着，在沟槽上壁面右侧区域压力下降减慢，上升幅度大于下降幅度，最终压力值大于起始压力值，具有一定的增压效果，承载能力增强，为流体动压润滑提供了有利的条件。文献[16]得出结论为凹槽深度一定时，存在最优的凹槽宽度，对应着最大的油膜承载，与此处结论一致。

2.3 微沟槽深度对流场的影响

设定沟槽宽度 $w_g = 40$ μm，沟槽深度 $h_g =$ 30 μm，50 μm，70 μm，对模型一微沟槽深度对流场的影响进行分析。图 13 为沟槽深度 h_g 对流场影响的矢量图，可以看出：当 $h_g = 30$ μm 时，线条较稀疏，且沟槽内部分流很少，流速较小；当 $h_g = 50$ μm 时，线条明显变密集，内部分流增多，流速增大；当 $h_g =$ 70 μm时，线条较前两者更加密集且变红，流速明显增大，而沟槽内部无明显流场。所以，润滑脂的流速

随着沟槽深度的增大而增大。

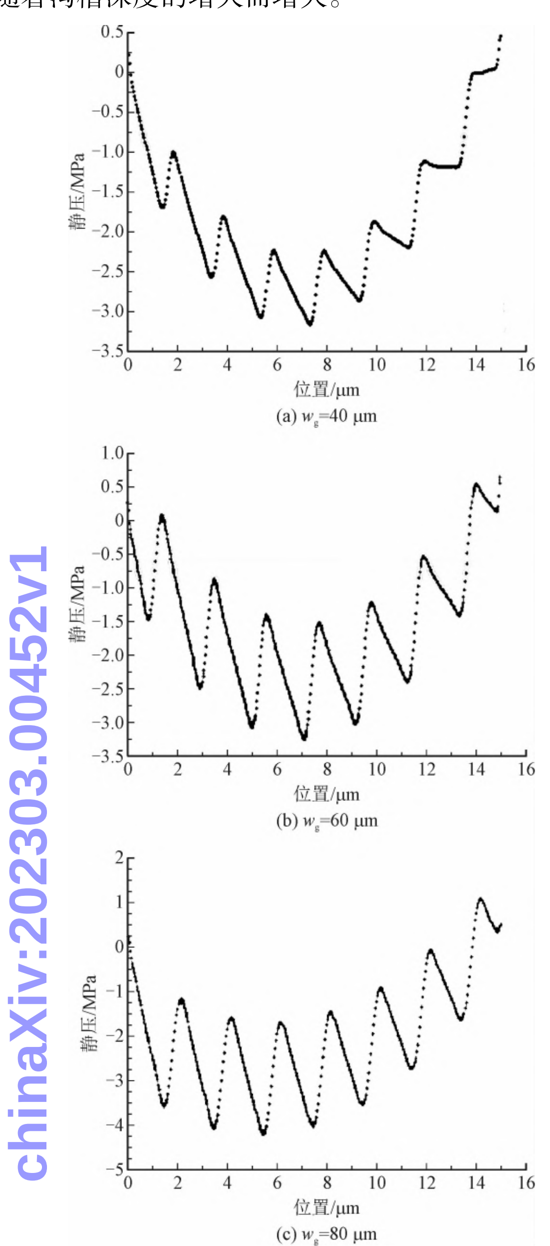


图 12 不同沟槽宽度时的上壁面静压力

Fig. 12 Static pressure of wall 1 with different w_g

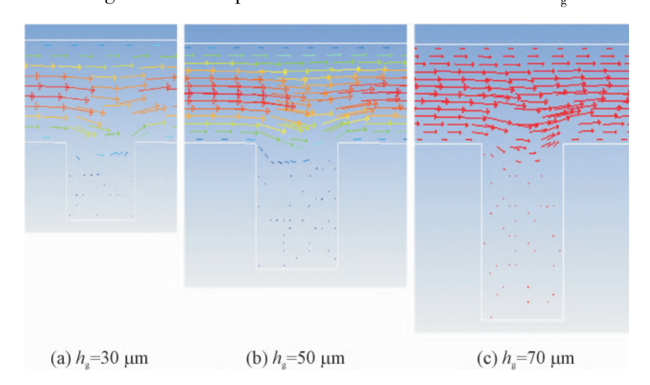


图 13 深度 h_g 对流场影响的矢量图

Fig. 13 Avector diagram of the depth effect on the flow field

图 14 为对应的上壁面(wall 1)静压力。可以看出,曲线走势特征与图 12 基本一致,上壁面压力值的最大值亦是先增大、后减小,在 h_g = 50 μm 左右时,压力值最大,存在最优解。文献[17]得出存在最佳的沟槽深度使得交叉沟槽所产生的流体动力润滑效应达到最强,与此处结论一致。

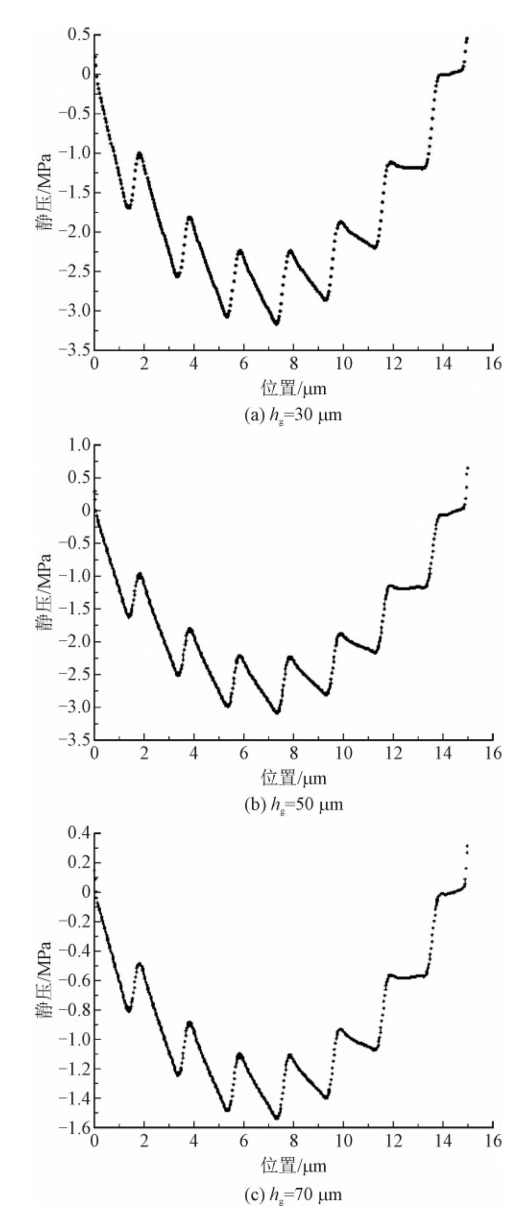


图 14 不同沟槽深度时的上壁面静压力

Fig. 14 Static pressure of wall 1 with different h_g

2.4 微沟槽角度对流场的影响

设定沟槽深度 h_g = 30 μm,宽度 w_g = 40 μm,角度 δ = 20°,40°,60°,80°,对模型二微沟槽角度对流场的影响进行分析,结果如图 15 和图 16 所示。由图 15 可知,在模型的进油端颜色较红,出油端为蓝色。且出油端蓝色区域面积随着沟槽角度 δ 的增大

而增大，沿着沟槽逐渐向左端延伸。再结合图 16 可知，沟槽内油液压力和流速随着沟槽角度 δ 的增大先是减小再增大，并在 $\delta=40°$ 左右时达到最小值。所以，在设计微沟槽时，可适当增大角度，使进油端和出油端压力差增大，可促进润滑脂的流动，达到更好的润滑效果。

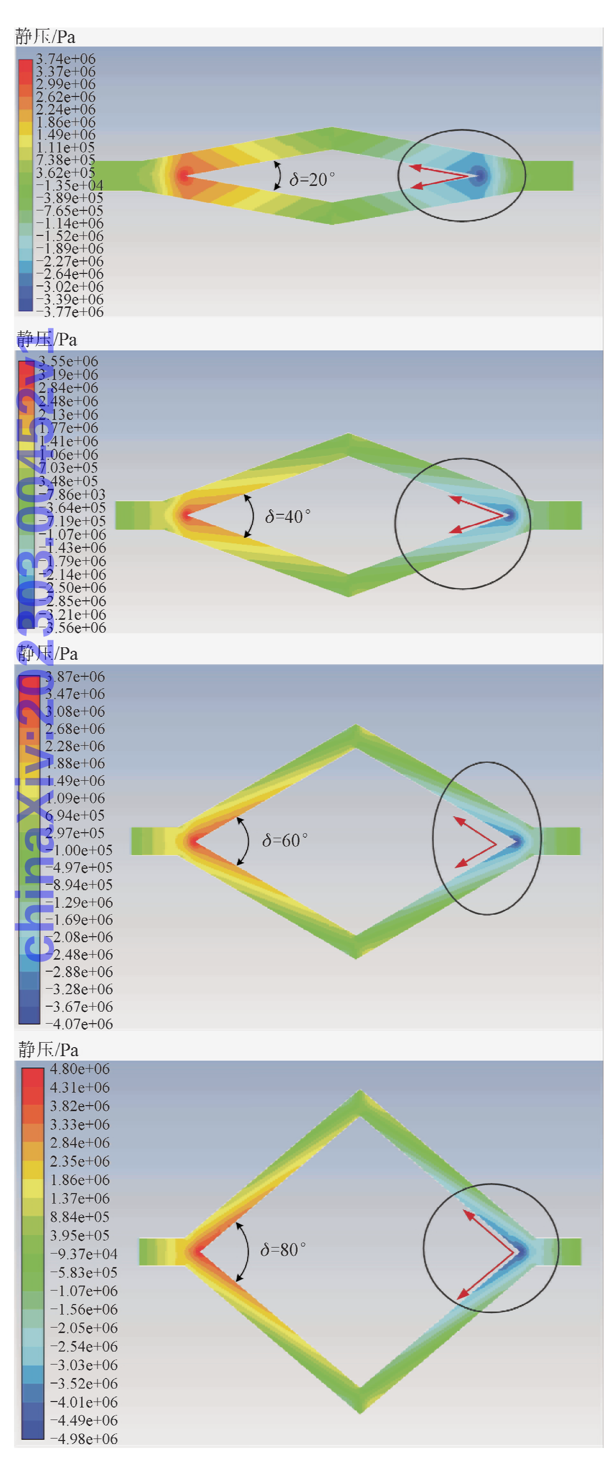


图 15　角度 δ 对流场压力的影响

Fig. 15　The effect of angle δ on the flow field

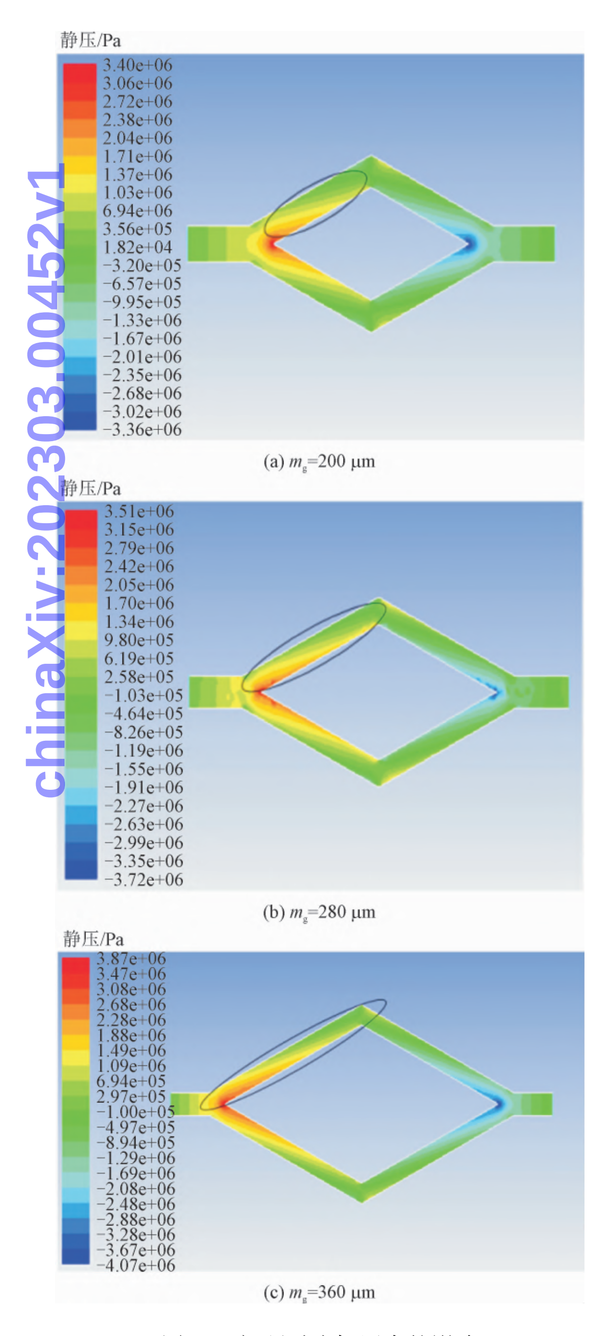
图 16　角度 δ 对流场速度的影响

Fig. 16　The effect of angle δ on the velocity rating

2.5　微沟槽间距对流场的影响

设定沟槽角度 $\delta=60°$，$h_g=30$ μm，宽度 $w_g=40$ μm，$m_g=200$ μm，240 μm，280 μm，对模型二微

沟槽间距对流场的影响进行分析结果如图 17 ~ 图 18 所示。可以看出:进出端口压差较大,在 m_g = 200 μm时,其压力等值线较短,很快与壁面接触,流动性被削弱,压力和流速都较小;相反,随着沟槽间距 m_g 的增大,图中椭圆圈里的压力等值线不断延展,流动的连续性变好,压力和流速不断增大。所以,沟槽间距的增大对流体润滑有积极作用,适当的增大沟槽间距可提高润滑脂的流动性和连续性,从而增进和保持润滑效果。



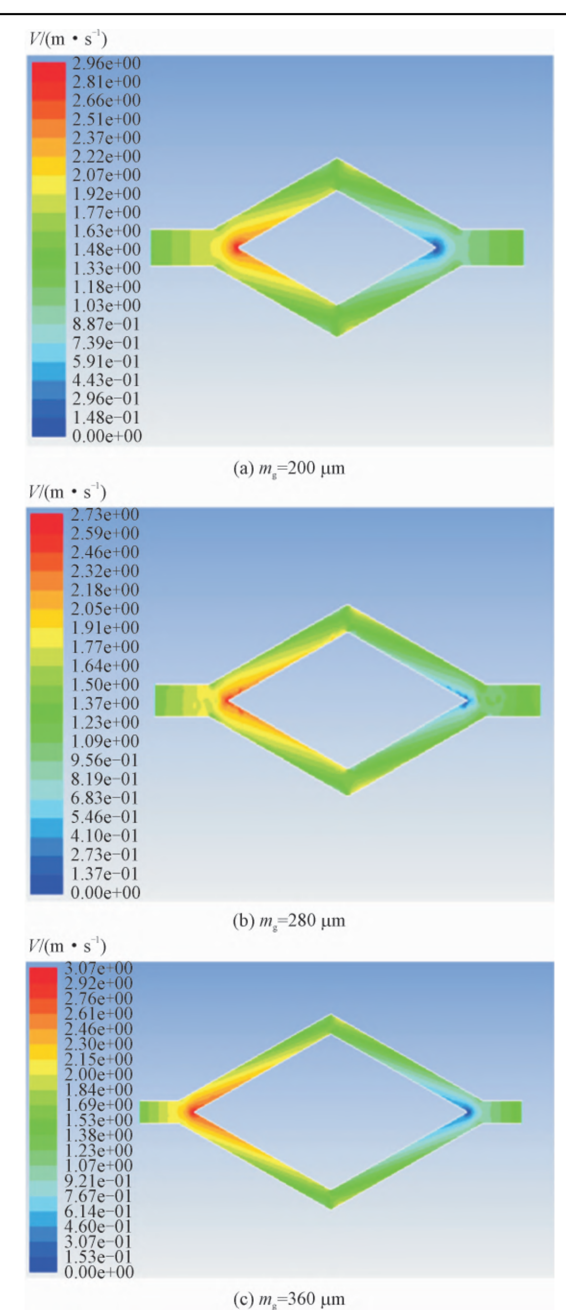
(a) m_g=200 μm

(b) m_g=280 μm

(c) m_g=360 μm

图 17 间距对流场压力的影响

Fig. 17 The effect of space on the flow field pressure



(a) m_g=200 μm

(b) m_g=280 μm

(c) m_g=360 μm

图 18 间距对流场速度的影响

Fig. 18 The effect of space on the flow field velocity

3 结 论

本文主要对微沟槽进行了流体仿真分析,将三维模型简化为两种二维模型,分别为齿宽方向沟槽简化模型(模型一)和齿面沟槽简化模型(模型二);并将两种模型分别导入 ANSYS 的 Fluent 模块中进行分析,并获得以下主要结论。

1)在对宽度 w_g 和深度 h_g 分析过程中发现微沟槽处均形成了两个速度差别较大的流场,随着宽度

w_g和深度h_g大小变化，上壁面沟槽的左侧和右侧区域均形成高低速区。

2）通过对微沟槽宽度w_g分析发现：随着w_g的增大，流体矢量线条明显变密集，内部分流增多，最终压力值大于起始压力值，具有一定的增压效果，承载能力增强。对微沟槽深度h_g分析发现：随着h_g的增大，线条先是较稀疏，流速较小；接着，线条明显变密集，内部分流增多，流速增大；最后，线条更加密集且变红，流速明显增大，但压力是先增大后减小；所以对于增压，h_g存在最优值。

3）对微沟槽角度δ分析发现：沟槽内部油液压力和流速随着沟槽角度δ的增大先是减小再增大，并在$\delta = 40°$左右时达到最小值。

4）对微沟槽间距m_g分析发现：随着m_g的增大，压力等值线不断延展，流动的连续性变好，压力和流速数值不断增大，所以适当增大m_g可提高润滑脂的流动性和连续性，增进和保持润滑效果。

参考文献

[1] COSTA H L, HUTCHINGS I M. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions[J]. Tribology international, 2007, 40(8): 1227-1238.

[2] QIU M F, DELIC A, RAEYMAEKERS B. The effect of texture shape on the load-carrying capacity of gas-lubricated parallel slider bearings[J]. Tribology letters, 2012, 48(3): 315-327.

[3] SHEN C, KHONSARI M M. Numerical optimization of texture shape for parallel surfaces under unidirectional and bidirectional sliding[J]. Tribology international, 2015, 82: 1-11.

[4] ETSION I. Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication[J]. Friction, 2013, 1(3): 195-209.

[5] RONEN A, ETSION I, KLIGERMAN Y. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components[J]. Tribology transactions, 2001, 44(3): 359-366.

[6] MA C B, ZHU H. An optimum design model for textured surface with elliptical-shape dimples under hydrodynamic lubrication[J]. Tribology international, 2011, 44(9): 987-995.

[7] 汤丽萍，刘莹. 表面微织构对重载齿轮传动摩擦性能的影响[J]. 清华大学学报（自然科学版），2010, 50(7): 1009-1012. (TANG Liping, LIU Ying. Influence of surface micro-texture on the tribological properties of heavy-duty gears[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2010, 50(7): 1009-1012 (in Chinese)).

[8] 万轶，李建亮，熊党生. 滑动速度对织构化表面润滑状态的影响[J]. 中南大学学报（自然科学版），2015, 46(12): 4442-4447. (WAN Yi, LI Jianliang, XIONG Dangsheng. Influence of sliding velocity on lubrication state of surface texturing[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2015, 46(12): 4442-4447 (in Chinese)).

[9] 韩志武，吕尤，牛士超，等. 仿生表面形态对齿轮弯曲疲劳性能的影响[J]. 吉林大学学报（工学版），2011, 41(3): 702-705. (HAN Zhiwu, LÜ You, NIU Shichao, et al. Bending fatigue strength of gear surface with grid micro-morphology[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2011, 41(3): 702-705 (in Chinese)).

[10] 邵飞先. 乏油条件仿生耦合齿轮材料的摩擦磨损行为[D]. 长春：吉林大学，2015.

[11] 葛良辰，马剑军，曹宇鹏，等. 激光微加工在微织构技术中的应用及研究进展[J]. 激光与红外，2019, 49(8): 921-928. (GE Liangchen, MA Jianjun, CAO Yupeng, et al. Influence of micro texture and its parameters on the effect of lubrication reduction[J]. Laser and infrared, 2019, 49(8): 921-928 (in Chinese)).

[12] 张赟，邓建新，岳鸿志，等. 微织构对钢制导轨表面摩擦性能的影响[J]. 制造技术与机床，2019(11): 17-23. (ZHANG Yun, DENG Jianxin, YUE Hongzhi, et al. Effect of micro-texture on the surface friction properties of steel guide rails[J]. Manufacturing technology and machine tool, 2019(11): 17-23 (in Chinese)).

[13] 解玄，尹必峰，华希俊，等. 脂润滑条件下 PTFE/GCr15 激光织构表面滑动摩擦性能研究[J]. 表面技术，2019, 48(8): 77-82. (XIE Xuan, YIN Bifeng, HUA Xijun, et al. Research on sliding friction properties of PTFE/GCr15 laser textured surface under grease lubrication[J]. Surface technology, 2019, 48(8): 77-82 (in Chinese)).

[14] 张国政，韩江. 内啮合斜齿轮副齿面接触应力与有限元分析[J]. 应用力学学报，2018, 35(3): 544-550. (ZHANG Guozheng, HAN Jiang. Contact stress of gear tooth surfaces and finite element analysis of internal meshing helical gear[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2018, 35(3): 544-550 (in Chinese)).

[15] 屈帅丞，李阳，江俊. 基于 CFD 模拟的翅片管束多孔介质模型建立方法及流场模拟[J]. 应用力学学报，2020, 37(2): 494-499. (QU Shuaicheng, LI Yang, JIANG Jun. CFD based method for porous medium model of finned tube bundles and flow field simulation[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(2): 494-499 (in Chinese)).

[16] 赵运才，韩雷. 部分表面凹槽织构动压润滑性能的 CFD 分析[J]. 中国表面工程，2013, 26(6): 112-118. (ZHAO Yuncai, HAN Lei. CFD-analysis of partiall surface groove texture on hydrodynamic lubrication[J]. China surface engineering, 2013, 26(6): 112-118 (in Chinese)).

[17] 纪敬虎，董保栋，陈天阳，等. 交叉沟槽织构化粗糙表面流体润滑数值分析[J]. 表面技术，2019, 48(8): 39-47. (JI Jinghu, DONG Baodong, CHEN Tianyang, et al. Numerical analysis of hydrodynamic lubrication of textured surfaces with cross-hatched grooves[J]. Surface technology, 2019, 48(8): 39-47 (in Chinese)).

（编辑　黄崇亚）